

세계 고속열차 기술개발 동향과 시사점

Overview and Implication of Technical Trend of New High-speed Train in the World

박춘수* 김기환** 김상수
Park, Choonsoo Kim, Kiwhan Kim Sangsoo

ABSTRACT

High-speed railway is important transportation in the world because it is very comfortable, environmental benefits, energy savings, etc. The increase of demand for high-speed railway influence to develop of new high-speed trains. Many countries introduced new high-speed train in the market. It meets to the market's needs. They adopt new technology and systems like that active suspension, synchronous permanent magnetic motor, distributed drive system, aero acoustics, etc. In Korea, the project for R&D of new high-speed train is launched last year. We need analysis of technical trend of new high-speed trains in the world. This paper presents a overview of technical trend of new high speed trains and what is key issues in development of high-speed train. It is very useful to develop a next generation high-speed train in Korea.

1. 서 론

1964년 일본에서 시작된 고속철도의 역사는 이제 반세기를 향하여 달려가고 있다. 세계 각국에서는 고속철도의 편리성, 환경친화성, 정시성 등 많은 장점을 이용하기 위해 운행구간을 늘리려는 계획을 수립하고 있으며, 이러한 계획은 실제로 건설과 운영으로 이어지고 있다. 특히, 유럽과 아시아를 중심으로 고속철도망이 획기적으로 늘어나고 있으며, 미국, 아르헨티나 및 브라질을 중심으로 한 아메리카와 모로코 등의 아프리카까지 세계 각지에서 고속철도의 도입이 활발하게 검토되고 있다.

세계 각국의 고속철도 수요의 증가는 철도선진국의 고속열차 개발에 직접적으로 영향을 미치고 있다. 일본 프랑스 독일을 중심으로 새로운 고속열차의 개발은 이러한 수요의 증가에 능동적으로 대처하기 위해 성능 향상, 운영의 유연성 향상, 신기술의 적용, 환경 친화성을 높이는 등의 방향으로 진행되고 있다. 우리나라에서도 KTX의 개통과 한국형 고속열차기술의 개발 성공 등을 발판으로 KTX 이후의 수요와 세계시장을 겨냥한 차세대 고속열차 개발을 위한 연구개발사업이 진행되고 있다. 한국형 고속열차는 국내의 추가 수요 흡수를 위한 고속열차 도입에 KTX-II라는 사업으로 기술이 연계되어 상업화 프로젝트로 제작되고 있다. 이러한 시점에서 세계 철도 선진국에서 추진되는 고속열차의 특징을 분석하고 이를 국내 실정에 맞도록 재조명해보는 작업은 매우 의미가 크다고 할 수 있다.

본 논문에서는 우리나라에서 진행되는 차세대 고속열차의 개발과 관련하여 일본, 독일, 프랑스의 최근의 기술개발 동향을 살펴보고, 개발되는 고속열차의 기술적 특징을 분석하여 기술의 흐름을 파악하고자 한다. 또한, 철도 선진국의 고속열차 개발 동향으로부터 우리의 상황과 연계시켜 우리가 개발해야 하는 기술개발을 살펴보고자 한다. 기술이라는 것은 현재의 신기술이 미래에는 낡은 기술로 퇴보하고, 보다 더 성능과 기능을 향상한 기술이 출현하는 진보와 발전을 거듭한다. 고속열차의 기술도 이제는 새로이 연구되어야 하고, 차세대 고속철도도 언젠가는 낡은 기술로 전락할 것이다.

* 한국철도기술연구원, 고속철도사업단, 정회원
E-mail : cspark@krri.re.kr
TEL : (031) 460-5621 FAX : (031)460-5649
** 한국철도기술연구원, 고속철도사업단

2. 세계 고속열차 기술개발 동향

2.1 일본

2.1.1 개요

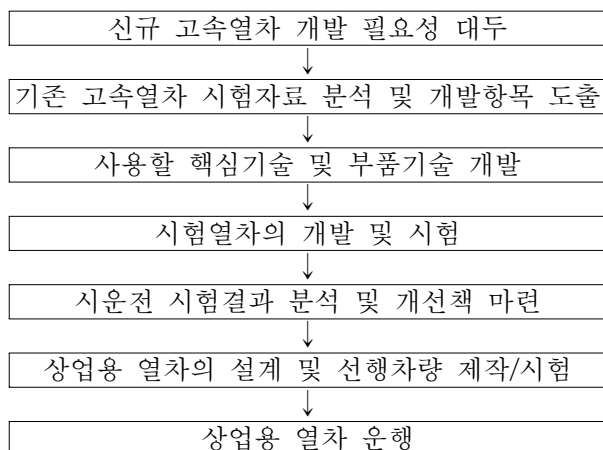
일본은 1964년 세계 최초로 고속열차를 개발한 이래 끊임없이 새로운 고속열차를 개발하고 있다. 0계 신간선을 시작으로 100계, 200계, 300계, 400계, 500계, 700계, 700T, N700, 800계, E1, E2, E3, E4까지 다양한 고속열차를 개발하여 사용하고 있다. 이 고속열차들은 사용환경과 운영조건에 따라 개발의 방향을 달리하기도 하였으며, 기술의 발전을 반영하여 좀 더 향상된 시스템의 채용을 통하여 열차의 성능을 향상시키는 기술개발을 진행하였다. 또한, 일본에서는 상업용 열차의 제작을 위해 초기에 시험용 열차(1000형, 951형, 961형, 962형, win350, STAR21, 300X, E954형, E955형)를 제작하고 각종 시험을 거쳐 시스템에 대한 신뢰성을 확보하는 과정을 거치고 있다. 일본에서의 고속열차 개발과정을 정리하면 <표 1>과 같이 나타낼 수 있다.

2.1.2 기술적 특징

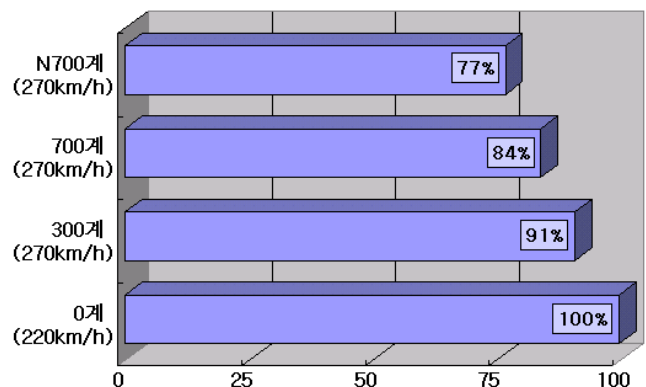
일본은 초기 개발단계부터 현재까지 지속적으로 동력 분산식을 사용하고 있으며, 열차의 운행속도는 초기 시속 200km에서 현재는 300km까지 운행하고 있다. 최근에는 속도 향상에 집착하기 보다는 에너지 효율의 증대, 환경파괴 최소화 등에 초점을 두고 기술개발이 추진되었다. 여기서는 N700계와 동일본철도에서 시험용 열차로 제작한 FASTECH 360S를 중심으로 기술개발 내용을 살펴보고자 한다.

2.1.2.1 N700계 [1]

N700계는 700계를 바탕으로 i)동해도.산양신간선에서 최고속도 실현, ii)실내 쾌적성 향상, iii) 환경친화성 증대 및 에너지 소비 최소화 등을 기본 개념으로 개발되었다. 이러한 기본개념을 실현하기 위해 N700계에는 틸팅시스템, 공력특성을 향상한 전두부, 고성능 능동제어 현가장치 등의 최신의 기술을 채택하였다. 틸팅시스템은 에어백 방식을 사용하여 차체를 1° 기울여서 곡선부에서의 승객 승차감을 향상시켜 고속으로 주행하도록 하고 있으며, 이는 곡선반경 2500m인 곡선에서 250km/h로 주행하던 것을 270km/h로 속도를 향상시켜 주행할 수 있도록 하였다. 또한, 기동가속도를 700계의 1.6~2.0km/h/s에서 2.6km/h/s로 대폭 향상시켜, 최고속도에 도달하는 시간을 대폭 줄였으며, 최고 운행속도도 동해도 구간에서 270km/h, 산양신간선에서 300km/h 주행하도록 하여 동경-오사카 구간에서 약 5분의 운행시간을 단축하였다. 일반적으로 속도의 향상은 승차감의 악화로 이어지지만 N700계는 고성능 능동현가장치를 채택하여 좌우 진동을 줄일 수 있도록 하였다. 환경파괴의 최소화를 위해 유전자 알고리즘을 이용한 전두부 공력 해석을 통해 최적의 형상을 도출하였다. 이외에도 소음의 감소를 위해 대차 주위에 덮개를 사용하였으며, 차량간의 연결부는 외측을 전부 막아 공력 소음을 최소화 하도록 하였다. N700계는 출력을 높여 속도를 향상시켰으나, 총 중량은 1% 낮추는 경량화를 실현하였으며, 전장품의 성능향상 등을 통해 에너지 소비를 700계 대비 10% 감소시켰다. (<그림 1> 참조)



<표 1> 일본의 고속열차 개발 과정



<그림 1> 차종별 소비 전력량 비교

2.1.2.2 FASTECH 360S [2]

FASTECH 360S는 동일본철도기술연구소 주도로 개발한 고속선 전용 시험열차로 최고운행속도 360km/h를 목표로 개발하였으며, 2005년 6월부터 시운전시험을 시작하여 398km/h 최고속도시험과 각종 성능시험을 실시하였고, 최근에는 운영예정속도인 320km/h로 안정화 시험을 하고 있다. 이 열차는 i) 주행속도의 향상 ii) 안전성 및 신뢰성의 확보 iii) 환경과의 조화 iv) 쾌적성의 향상을 기본 개념으로 개발되었다. i) 주행속도의 향상을 위해 공냉식 및 수냉식 컨버터를 개발하였으며, 공냉식 주변압기 채택, 영구자석 동기전동기 채택과 같은 노력을 하였다. 또한, 고속에서 집전을 안정적으로 할 수 있는 다분할 집전판을 사용한 고속집전시스템을 개발하였다. ii) 환경과의 조화를 위해서는 차체 유선형, 저소음 판토, 흡음재 사용, 판토소음 차음판 사용 등을 통해 소음저감을 이룩하였다. 또한, 열차 전두부 길이를 길게하고(16m), 차량단면적을 축소하는 등 고속으로 인한 환경 파괴를 최소화하도록 하였다. iii) 신뢰성 확보를 위해서는 새로이 개발된 고속대차에 사용하는 주행부품, 축베어링, 제동장치 등은 사전에 시험기에서 충분한 시험을 실시하였으며, 본선 시험에서 대차 점검주기인 60만 km까지 시험을 실시하여 신뢰성을 확보할 예정이다. iv) 열차의 쾌적성 향상을 위해서는 능동형 현가시스템 채택, 바닥창문 등의 방음성능 향상, 에어백을 이용한 틸팅시스템을 사용하였다. 이 열차는 개발개념을 실현하기 위해 많은 신기술들이 채택되었으며, 특히 시험열차의 특성을 살려 1개의 열차에 각각 다른 이종의 시스템을 채택하여 그 특성을 파악하도록 한 것이 특징이라 할 수 있다. 먼저 전두부는 화살형(Arrow type)과 유선형(Stream-line type)을 각각의 전두부에 채택하여 주행저항, 터널통과시의 미기압과 등의 특성을 파악하였다. 대차는 현가시스템의 일부 특성을 달리한 3가지를 사용하였으며, 견인전동기도 유도전동기와 영구자석 동기전동기를 사용하였고, 제동에도 2개의 회사의 제동장치를 사용하였을 뿐만 아니라 공기저항에 의한 제동방식을 채택하여 성능을 검증하는 시험을 실시하였다. 이외에도 실내의 디자인 의자배치 등 가능한 모든 부분에 복수의 개념을 도입하여 상용열차의 설계에 반영하기 전에 선택의 폭을 넓힐 수 있도록 하였다.

<표 2> 일본 최근 고속열차의 주요 특성

구 분	N700계	Fastech360S
운영최고속도 (km/h)	300, 270	320(360)
축중 (평균, 톤)	10.9	11.5
추진시스템(전력소자)	IGBT	IGBT
견인전동기 (kw)	유동전동기 (305)	유도(370, 350), 동기(355)
중량대비 출력 (kw/ton)	24.4	23.4
틸팅시스템	적용 (에어백)	적용 (에어백)
현가장치	반능동형 현가장치	능동형 현가장치

2.2 프랑스

2.2.1 개요

프랑스는 그동안 1980년대 개발한 TGV 1세대로 부터 최근 개발된 4세대 열차까지 계속해서 속도를 향상시키고, 새로운 기술을 접목시키면서 발전해 왔다. 또한, 프랑스의 고속열차 기술은 세계 최고의 시험속도 기록을 갖고 있다. 지난 1990년 시속 515.3 km를 기록하였으며, 2007년 4월에는 시속 574.8km를 달성하여 세계 최고의 기록을 변경하였다. 이러한 기술의 개발은 프랑스 국영 철도회사(SNCF)를 주축으로 이루어졌으며, 제4대 고속열차인 AGV는 차량제작사를 중심으로 개발되었다. 프랑스의 고속열차는 우리나라를 비롯하여 스페인 등에 진출하였으며, 관절형 대차라는 독특한 방식을 일관되게 사용하고 있다.

2.2.2 기술적 특징 [3]

프랑스는 초기에 진동/소음 등에 유리한 관절형 연결대차를 채택하여 사용해 오고 있으며, 일본과 달리 동력집중식(push-pull 방식)의 열차 편성을 유지하여 왔다. 그러나 제 4세대 열차는 연결대차는 유지한 반면 동력 집중식에서 모듈화한 동력 분산식을 채택하여 시장의 변화 요구에 대응하고 있다. 여기서는 최근의 고속열차인 AGV의 기술적 특성에 대하여 살펴보도록 한다.

AGV는 기존 TGV의 최고 운행속도인 320km/h를 360km/h까지 향상하기 위하여 많은 새로운 기술을 채택하였다. i) 열차의 경량화, AGV는 연결대차의 취약점인 축중을 TGV와 동일한 17톤으로 유지하기 위하여 많은 노력을 기울였다. 즉 속도의 향상과 객차에 동력을 취부하는 이종의 한계를 경량화 기술개발을 통해 달성하였다. 차체는 길이를 약간 줄였으며(TGV는 18.7m, AGV는 17.3m), 차량 단부에는 복합재를 사용하여 steel 대비 700kg을 줄였다. 또한, 객차 하부에 취부하는 변압기, 추진시스템 및 견인전동기의 중량을 획기적으로 줄이는 노력을 하였다. 추진시스템은 수냉식 IGBT 시스템을 채택하였으며, 변압기는 경량화 winding 방식을 적용하였고, 견인전동기는 영구자석 동기전동기를 사용하였다. 특히 전동기는 일반적인 유도전동기가 0.8kw/kg인 반면, AGV의 전동기는 1kw/kg의 성능을 갖는 획기적인 기술의 진보를 이루었다. ii) 소음저감, AGV는 속도 향상에 따라 증가하는 소음을 감소하기 위해 전두부 형상변경, 대차 덮개 채택, 차량간 연결부 차폐, 판토품 성능향상 등을 통해 소음을 낮추도록 노력하였다. iii) 호환성, 유럽에서는 새로이 개발 운영되는 지역간 열차에 대하여 여러나라에서 동시에 운영될 수 있도록 TSI(Technical Specification for Interoperability) 규격을 제정하여 운영하고 있다. AGV는 이 규격에 맞도록 많은 부분이 개발되었으며, 25 및 15KV AC 구간과 3 및 1.5KV DC 구간을 운행할 수 있다. iv) 모듈화, AGV는 7, 8, 11, 14량으로 편성할 수 있도록 모듈화 개념을 적용하여 개발하였다. 기본적으로 3량(변압기 차량, 주전력변환장치 차량, 보조전원 차량)을 1개의 단위로 하여 운행노선의 수요에 따라 조합하여 운영할 수 있도록 하였다. AGV의 주요한 기술적 특징은 <표 3>에서 볼 수 있다.

2.3 독일

2.3.1 개요

독일도 프랑스와 동일하게 1980년대 개발한 ICE 1에서 출발하여 ICE3까지 성능을 향상시켜 왔으며, 최근에는 ICE3에 기술적 바탕을 두고 있는 Velaro Series가 차량제작사인 지멘스(Siemens)에서 개발되고 있다. 전통적으로 독립대차 동력집중식을 사용하여 왔으나, ICE3 부터는 동력분산식을 사용하고 있다. 여기서는 최근에 개발되어 시운전중인 Velaro E(스페인에 운영)의 기술적 특성에 대해서 살펴보고자 한다.

2.3.2 기술적 특징[4]

ICE는 초기부터 알루미늄을 사용하여 차체를 제작하였으며, 열차제어시스템에 첨단 IT기술을 적용하여 왔다. 이러한 기본적인 기술적 특징 외에는 일본, 프랑스와 시스템적으로는 동일한 특성을 보이고 있다. 최근에 개발된 ICE3는 급구배에서 운행이 가능하도록 동력분산식을 채택하였으며, 축중을 19톤에서 14-15톤으로 낮추었다. 이러한 ICE3 기술은 러시아(Velaro-RUS), 중국(Velaro-CN), 스페인(Velaro-E)의 요구사항에 맞도록 다양한 차량의 제작에 기본적으로 사용되었다.

<표 3> 프랑스와 독일 최근 고속열차의 주요 특성

구 분	AGV	Velaro-E
운영최고속도 (km/h)	360	350
축중(평균, 톤)	16.54	14.5
추진시스템(전력소자)	IGBT	IGBT
견인전동기	영구자석 동기전동기 (770kw)	유도전동기 (550kw)
중량대비 출력(kw/ton)	22.6	20.71
동력 배치	분산식, 모듈형	능동형 현가장치
대차형태	연접대차	독립대차

3. 기술개발의 특징

3.1 고속화

초기의 고속열차는 시속 200km 대였으나, 1990년대 시속 300km의 열차가 운행되기 시작하였으며, 2000년대에는 320~350km 고속열차가 운행하거나 준비 중에 있다. 고속열차는 고속으로 달려야 한다는 기본적인 사명으로부터 기술개발에서 고속화는 매우 중요한 이슈이다. 앞에서 살펴본 여러나라의 기술개발 결과도 1차적으로 속도를 향상시키는데 기본적인 초점을 맞추고 있다. 속도를 향상시키기 위해 여러 가지 기술을 접목하고 새로운 기술개발을 추진하고 있다. 이러한 속도의 향상은 끝이 없을 것이며, 현재까지의 지향점은 시속 350km 근방에 두고 있다. 일반적으로 승객들이 여행에서 불편함을 느끼는 시간을 3시간 이후로 보면, 350~400km/h 속도까지 기술개발이 이루어져야 고속열차의 운행 구간이 비행기와 경쟁하는 1000km까지 확대할 수 있다. 따라서, 향후에도 고속열차 기술 선진국은 속도향상을 위한 기술개발에 많은 노력을 기울일 것이다.

3.2 동력방식

고속열차가 개발된 초기에는 일본을 제외하고는 기관차 방식의 동력 집중식을 채택하였다. 일본은 처음부터 동력분산식을 채택하였다. 각각의 방식은 장단점을 갖고 있으며, 일반적으로 동력분산식이 집중식보다 가감속 성능을 높게 할 수 있고, 동력축의 증가로 더 높은 열차의 출력을 사용할 수 있다. 또한 에너지적인 측면에서 동력축의 증가는 전기제동의 사용을 늘려, 회생제동력으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 고속열차의 속도향상은 출력을 늘리고 저항을 줄이는 두 방향으로의 기술개발이 필요하며, 출력을 높인다 하더라도 점착력의 한계를 극복할 수는 없다. 따라서 집중식은 동력축의 수가 작기 때문에 열차의 점착력을 늘리는데 한계가 있다. 따라서 프랑스 및 독일에서 운행속도를 시속 350km이상으로 기술개발을 하면서 동력분산식으로 방향을 선회할 수 밖에 없었을 것이다. 고속열차의 고속화와 함께 동력분산식의 채택은 필연적이며 미래 기술개발의 기본적인 틀로 굳혀질 것이다.

3.3 환경친화

철도가 갖고 있는 기본적인 특성중에 다른 교통수단과 비교하여 환경친화적이라는 것은 널리 알려져 있다. <표 4>는 CO2 배출량을 기준으로 살펴본 교통수단별 환경 특성이다. 고속열차의 개발에서 속도의 향상은 소음 및 진동의 증가와 에너지 소비 증가, 터널통과시의 미기압파의 증가로 이어진다. 따라서 이러한 환경의 영향을 최소화시키는 것은 기술개발에서 매우 중요한 부분이다. 철도선진국들은 환경에 대한 영향을 줄이기 위해 전두부 형상 최적화, 부품 및 차체의 경량화, 전기시스템의 효율 향상과 같은 노력을 기울여 에너지 소비를 최소화하려 하고 있다.

<표 4> 교통수단별 CO2 배출량 [5]

교통수단	승객거리당 배출	차량당 배출	차량당 승객수
재래선	0.21	66.96	322
고속열차	0.26	25.10	97
자동차	0.53	0.85	1.6
항공	0.62	48.04	77

3.4 경량화

속도의 증가를 위해서는 주행저항을 줄여야 하며, 환경의 영향을 최소화하기 위해서도 경량화는 필수적이라 할 수 있다. 초기에는 강재를 차체에 사용하였으나, 최근의 모든 고속열차가 경량 소재인 알루미늄 합금을 주재료로 사용하고 있으며, 아직까지는 제한적으로 사용되고 있기는 하나 복합소재의 적용을 늘리려는 노력도 지속적으로 시도되고 있다. 차체의 경량화는 기술개발의 측면에서는 획기적인 새로운 재질이 채택되기 전에는 지속적인 발전에 한계가 있다. 최근에는 차체외에 전장품 등의 성능 향상을 시도하면서 이러한 각 장치의 경량화 연구에도 적극적으로 관심을 기울이고 있다.

3.5 신기술 적용

고속열차에는 새로운 기술들이 적용되기 위해 그 기술을 시험하고 특성을 파악하는 연구가 끊임없이 이어지고 있다. 특히 전기/제어기술, 정보통신기술 및 해석기술의 발달은 고속열차에 바로 적용될 수 있는 기술이다. 소재기술의 발달로 알루미늄 차체가 보편화 되었으며, 제어/통신기술의 발달로 공기 지령식 제동장치에서 전기지령식 제동방식으로, 열차 제어진단장치의 개발로 이어졌다. 새로이 개발되고 있는 고속열차에는 제어진단장치가 지능화되고 있으며, 신호통신의 발달로 운행간격 및 열차제어의 정확성이 향상될 뿐만 아니라, 승객의 편의를 위한 각종 편의시설의 성능이 향상되고 있다. 이러한 신기술의 적용은 영구자석 동기전동기, 능동형 현가장치, 제동장치, 승객 개인용 모니터, 운전자 현시장치 등 여러 장치의 눈부신 발전을 가져와 고속열차 승객에 대한 만족도를 높이고 있다.

4. 결 론

고속열차의 개발은 국가의 경제발전과도 연관되며, 한 나라의 기술의 척도로 사용되기도 한다. 우리나라에선 2004년 고속철도가 운행되기 시작한 이후 국민의 삶의 질 향상에 기여한 바가 크다. 또한, 한 국형 고속열차를 우리 기술로 개발하여 철도 기술의 국가 경쟁력을 높힐 뿐만 아니라, 우리의 위치를 굳건히 하는 계기가 되기도 하였다. 이제는 이러한 기술개발을 바탕으로 철도선진국들이 지향하는 기술의 추세를 정확하게 파악하여 이러한 조류에서 밀려나지 않도록 기술개발을 게을리 하지 않아야 한다.

우리나라에서는 2007년부터 우리기술로 세계 고속철도와 어깨를 견줄 수 있도록 차세대 고속철도기술개발사업이 추진되고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 철도 선진국들은 끊임없이 기술개발을 이어가 세계시장에서 주도권을 잡으려고 노력하고 있다. 따라서, 우리도 속도의 향상, 경량화, 환경친화성의 향상, 신기술의 적용을 통한 핵심기술의 개발에 더욱 노력하여야 할 것이다. 세계 고속열차 기술개발에서 우리가 알 수 있는 것은 첫 번째는 단계적으로 기술을 향상시키는 것이다. 초기의 기술에서 시장의 변화와 기술의 발전에 맞도록 지속적으로 단계적으로 기술개발을 하고 있는 것이다. 두번째는 속도경쟁이다. 최근에 개발된 고속열차는 시속 350km대를 운행속도로 하고 있다. 그러나 속도의 목표는 계속해서 향상될 것이다. 세 번째는 국가별로 고유의 기술과 기술개발의 단계를 갖고 있다는 것이다. 일본과 독일은 시험열차의 개발을 통한 상용화로, 프랑스는 현재의 열차에 새로운 장치의 탑재를 통한 검증의 단계를 거쳐 상용화에 이어지고 있다. 우리나라도 이제는 고속열차 기술개발의 정형을 세우고 체계적인 접근이 필요한 위치와 시기로 접어들고 있다.

기술은 날로 발전하며, 늘 새로운 것은 없다. 고속열차의 기술개발도 끝은 없어 보인다. 오늘의 새로운 기술은 내일 낡은 기술로 이어진다. 따라서 부단한 기술의 개발만이 도태되지 않고 세계 고속열차 시장의 경쟁에서 우리나라가 살아나갈 수 있는 방법이다.

후기

본 연구는 국토해양부에서 추진 중인 차세대 고속철도기술개발사업인 “분산형 고속철도 시스템엔지니어링 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 田中 守외, “N700계 양산선행시작차의 개요”, R&M, 2005. 6, pp6 ~ 11.
2. JR East, Technical Review, No.4, Winter 2006
3. 알스톰 홈페이지 (<http://www.alstom.com>)
4. 지멘스 홈페이지 (<http://www.siemens.com>)
5. Center neighborhood Technology, High Speed Rail and Greenhouse Gas Emissions in the U.S.", 2006. 1